

УДК 533.9

## СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО ФИЗИКЕ ПЛАЗМЫ И УПРАВЛЯЕМОМУ ТЕРМОЯДЕРНОМУ СИНТЕЗУ (Обзор докладов, представленных на XLVII Международной Звенигородской конференции по физике плазмы и УТС, март 2020 г.)

© 2020 г. И. А. Гришина<sup>а</sup>, \*, В. А. Иванов<sup>а</sup>

<sup>а</sup> Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва, Россия

\*e-mail: grishina@fpl.gpi.ru

Поступила в редакцию 04.06.2020 г.

После доработки 20.06.2020 г.

Принята к публикации 20.06.2020 г.

Дан обзор новых наиболее интересных результатов, представленных на XLVII Международной Звенигородской конференции по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу, которая прошла с 16 по 20 марта 2020 г. в городе Звенигороде Московской области. Проведен анализ развития и достижений основных направлений исследований в области физики плазмы в России и их сравнение с работами за рубежом.

*Ключевые слова:* физика плазмы, термоядерный синтез, высокотемпературная плазма, низкотемпературная плазма, плазменные и микроволновые технологии, конференция, результаты

DOI: 10.31857/S0367292120120033

### 1. ВВЕДЕНИЕ

На XLVII Международной (Звенигородской) конференции по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу (УТС) было представлено 225 научных докладов из 65 российских и 16 иностранных научных центров.

Они относились, главным образом, к шести важнейшим направлениям физики плазмы:

1. Магнитное удержание высокотемпературной плазмы.
2. Инерциальный термоядерный синтез.
3. Физические процессы в низкотемпературной плазме.
4. Физические основы плазменных и лучевых технологий.
5. Проект ИТЭР: шаг в энергетику будущего.
6. Компьютерное моделирование плазмофизических процессов.

Состоялись четыре пленарных заседания с 15 обзорными докладами, в которых подводились итоги работ, выполненных за последний год в области физики высокотемпературной плазмы, управляемого термоядерного синтеза, низкотемпературной плазмы, и прикладных работ по плазменным и лучевым технологиям. Этим же направлениям была посвящена работа соответствую-

ющих секций конференции, на которых обсуждались 64 устных и 146 стендовых докладов. Затрагивались также смежные с физикой плазмы проблемы.

Общее число авторов докладов составило более 700 человек.

### 2. ПЛЕНАРНЫЕ ДОКЛАДЫ

В связи с 90-й годовщиной со дня рождения академика В.Д. Шафранова участники конференции почтили его память. Доклад о его вкладе в науку сделал М.Ю. Исаев (НИЦ “Курчатовский институт”). Виталий Дмитриевич Шафранов был выдающимся физиком-теоретиком, одним из основателей физики плазмы и управляемого термоядерного синтеза. Он является автором уравнения равновесия (уравнение Грэда–Шафранова), на основе которого рассчитаны и построены около 300 токамаков во всем мире, включая сооружаемый в настоящее время во Франции крупнейший экспериментальный токамак-реактор ИТЭР. Особый интерес В.Д. Шафранов проявлял к оптимизированным стеллараторным системам. По словам академика Б.Б. Кадомцева, уравнения Шафранова останутся в физике на века.

В июле 2020 года исполнилось 90 лет со дня рождения выдающегося ученого в области физи-

ки плазмы Анри Амвросьевича Рухадзе. О его работах рассказал В.А. Иванов (ИОФ РАН). Имя А.А. Рухадзе неразрывно связано с электродинамикой материальных сред с пространственной и временной дисперсией, физикой плазмы и релятивистской СВЧ-электроникой. Анри Амвросьевичем заложены основы новой области физики плазмы — физики излучающего газового разряда. На основе развитой теории таких разрядов созданы эффективные газоразрядные источники света для энергетической накачки мощных лазеров. А.А. Рухадзе по праву считается создателем релятивистской плазменной СВЧ-электроники. Многочисленные ученики, соратники и последователи А.А. Рухадзе продолжают исследования по заложенным и созданным им научным направлениям.

Обзор новых результатов термоядерных исследований, проведенных в европейских научных центрах, был дан Дж. Онгена (Королевская военная академия Бельгии, Брюссель). Доклад был представлен удаленно. На токамаке JET (Евросоюз, Великобритания) идет подготовка к экспериментам с тритиевой и дейтерий-тритиевой плазмой (экспериментальная компания DTE2). Целью кампании DTE2 является получение стационарного режима работы при мощности термоядерных нейтронов  $P_{fus} = 15$  МВт и длительности 5 секунд. Компания DTE2 должна также продемонстрировать возможность электронного нагрева центральной области плазмы в токамаке JET альфа-частицами, возникающими в результате термоядерных реакций с суммарной мощностью до 3 МВт. В докладе также был представлен обзор результатов, полученных на стеллараторе Wendelstein 7-X. Этот крупнейший в мире стелларатор разработан с целью получения хорошего удержания энергии и быстрых ионов в горячей плазме при следующих параметрах плазмы: температуры электронов и ионов близки и составляют  $T_i = T_e \sim 6$  кэВ, плотность плазмы превышает значение  $n_e = 10^{20} \text{ м}^{-3}$ , и средняя величина отношения давления плазмы к давлению удерживающего магнитного поля  $\langle \beta \rangle \sim 5\%$ . Демонстрация режима работы стелларатора в режиме “divertor plasma detachment” (режим с отрывом диверторной плазмы от диверторных пластин) при достаточно высокой плотности плазмы стала важным результатом последней кампании Wendelstein 7-X.

Доклад Л.Н. Химченко и А.В. Красильникова (Проектный центр ИТЭР) был посвящен ходу сооружения крупнейшего международного токамака ИТЭР. Выполнено 66% работ по сооружению инфраструктуры и изготовлению систем установки ИТЭР. Достигнут важный этап строительства — возведено перекрытие над шахтой сборки токамака. Следующая ближайшая задача — завершить сооружение трех центральных зданий: блок тока-

мака, блок тритиевого комплекса и блок диагностик, — составляющих единое целое, т.н. “Tokamak complex”. Это позволит параллельно с созданием комплексов подвода электрической энергии, отвода тепла, создания защитных модулей, кабельных трасс и др. начать сборку самой установки.

О работах, проводимых коллективом Института ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН по созданию высоковольтного нагревного инжектора пучка нейтральных атомов большой энергии, рассказал О.З. Сотников. Инжектор основан на ускорении пучка отрицательных ионов водорода и нейтрализации их в плазменной мишени. Проектная мощность инжектора 0.5–1 МВт. Дано детальное описание компонент инжектора и подведены итоги первого этапа работ по сооружению испытательного стенда на 1 МВ. В 2019 г. осуществлен физический пуск инжектора с испытанием его основных компонент. Получен и проведен через пучковый тракт на вход ускорительной трубки пучок отрицательных ионов водорода с полным током 1 А и энергией 80 кэВ.

С.В. Мирнов (Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований) проанализировал на первый взгляд необъяснимое явление, наблюдаемое в лабораторных токамаках. По мере увеличения толщины бериллиевой (Ве) фольги в системах регистрации мягкого рентгеновского излучения (МРИ) и уменьшения электронной плотности плазмы, наблюдается активное снижение интенсивности МРИ плазмы токамака, прошедшего через Ве фольги. Предложено объяснение этого с привлечением предположения об “обеднении” максвелловского распределения в пространстве электронных скоростей, превышающих в 3–5 раз тепловую скорость электронов плазмы. В качестве вероятной причины такого “обеднения” наиболее убедителен постулируемый в токамаках аномальный перенос электронного тепла вдоль слабо возмущенного тороидального магнитного поля (модель “магнитного флаттера”). Тем самым, т.н. “рентгеновская яма” может превратиться в активный инструмент изучения физической природы аномального электронного переноса в токамаках.

А.Ю. Попов и Е.З. Гусаков (Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН) рассмотрели нелинейные явления, наблюдаемые на различных установках в экспериментах по ЭЦР-нагреву плазмы на второй гармонике гирочастоты электронов. Эти явления возникают вследствие развития низкопороговых параметрических распадных неустойчивостей. К таким явлениям относятся аномальное обратное рассеяние, аномальный нагрев ионов, аномальное поглощение СВЧ-волны нагрева, уширение профиля поглощенной мощности и другие процессы. Для объяс-

нения этих явлений разработана теоретическая модель, учитывающая немонотонность радиального профиля плотности плазмы в тороидальных установках, которая может усиливаться из-за наличия магнитного острова, развития эффекта понижения плотности плазмы в центре плазменного шнура тороидальной установки, т.н. эффект “density-pump-out”, или возникновения локализованных на границе плазмы колебательных мод (ELMs). В рамках этой модели наблюдаемые нелинейные явления интерпретируются как результат вторичных нелинейных процессов, которые возникают в результате каскада последовательных распадов X-волны микроволнового излучения, используемого для ЭЦР-нагрева плазмы в магнитных ловушках

Удержание энергии в плазме сферических токамаков Глобус-М и Глобус-М2 рассматривалось в докладе коллектива авторов из ФТИ РАН, с которым выступил Г.С. Курский. На токамаке Глобус-М проведены эксперименты по нагреву плазмы пучком атомов при токе плазмы  $I_p = 0.12\text{--}0.25$  МА и тороидальном магнитном поле  $B_T = 0.25\text{--}0.5$  Тл. Оказалось, что зависимости времени удержания энергии от тороидального магнитного поля и тока разряда в сферическом токамаке Глобус-М значительно отличаются от зависимостей, предсказываемых скейлингом IPB98(y. 2). Результаты экспериментов свидетельствуют о том, что увеличение тороидального магнитного поля оказывает значительное влияние на термоизоляцию плазмы. Первые эксперименты по исследованию дополнительного нагрева плазмы токамака Глобус-М2 пучком атомов проводили при более высоких значениях тока плазмы и тороидального магнитного поля по сравнению с токамаком Глобус-М:  $I_p = 0.25\text{--}0.3$  МА и  $B_T = 0.7\text{--}0.8$  Тл. При инжекции пучка дейтерия мощностью 0.8 МВт с энергией частиц 28 кэВ в плазму токамака Глобус-М2 наблюдалось более чем двукратное увеличение полной запасенной энергии плазмы по сравнению с результатами, полученными на Глобус-М.

Планы исследований в области магнитных ловушек с линейной конфигурацией в ИЯФ СО РАН изложил П.А. Багрянский. В настоящее время ведутся работы по созданию открытой магнитной ловушки нового поколения с линейной осесимметричной конфигурацией (Газодинамической многопробочной ловушки – ГДМЛ). Целью проекта является отработка технологий, необходимых для реализации ряда термоядерных приложений таких систем: от мощных нейтронных источников до энергетического реактора, способного работать с различными видами топлива, не содержащими радиоактивный тритий и обладающими неограниченным ресурсом добычи. Предполагается, что ГДМЛ будет иметь мо-

дальную структуру, позволяющую оперативно переконфигурировать магнитную систему ловушки, которая будет сверхпроводящей с магнитной индукцией до 3 Тл в центральной плоскости ловушки и более 12 Тл в магнитных пробках. Это, в сочетании с системой инжекции пучков нейтральных атомов (мощность пучка 10 МВт, энергия частиц 30–40 кэВ при длительности импульса секундного диапазона) должно обеспечить полностью стационарные условия удержания термоядерной плазмы.

Особенности развития положительной длинной искры в воздухе описали Н.А. Попов (НИИ-ЯФ МГУ) и Э.М. Базелян (АО “Энергетический институт им. Г.М. Кржижановского”). Воздушным промежуткам с резко неоднородным распределением электрического поля свойственно ступенчатое развитие искрового разряда. Механизм формирования ступеней положительного лидера до сих пор остается непонятным, хотя существование самих ступеней сомнений не вызывает. Приведены результаты численного моделирования искрового разряда в длинном воздушном промежутке атмосферного давления при положительном напряжении с наносекундной длительностью фронта. Показано, что распространение возмущающего полевого воздействия наносекундной длительности до головной части первичного канала инициирует развитие от нее стримерной вспышки с начальной скоростью  $\sim 10^9$  см/с, что приводит к резкому усилению яркости излучения из канала. Причиной усиления излучения является активная наработка электронно-возбужденных частиц.

Большой интерес вызвал доклад Б.Б. Зеленера и соавторов (Объединенный институт высоких температур РАН) о свойствах ультрахолодной плазмы. С развитием методов лазерного охлаждения и пленения атомов в магнитооптической ловушке, а также в дипольной и магнитной ловушках, открылась возможность изучения взаимодействий в газе нейтральных и высоковозбужденных атомов различных элементов. При этом важно, что охлаждение частиц реализуется в плазме в условиях глубокого вакуума при температурах ниже 10 мК при наличии или отсутствии квантового вырождения. Появление специальных лабораторий в международном научном центре CERN позволило приступить к созданию и изучению атомов антиводорода при помощи торможения антипротонов в магнитном поле и столкновительного охлаждения с позитронным газом с последующим захватом атомов антиводорода в квадрупольную магнитную ловушку. В результате исследований впервые была получена и исследована стационарная ультрахолодная плазма, возбуждаемая в непрерывном режиме.

В.Ф. Тарасенко с соавторами (Институт сильноточной электроники СО РАН) рассмотрели диффузные разряды высокого давления, которые формируются в неоднородном электрическом поле за счет убегающих электронов. Приведены результаты экспериментальных исследований пучков убегающих электронов, генерируемых в различных газах высокого давления, а также показана роль убегающих и быстрых электронов при формировании диффузных разрядов в неоднородном электрическом поле. Были представлены оптимальные условия для получения пучков убегающих электронов с максимальными амплитудами. Продемонстрировано, что генерация быстрых и убегающих электронов обеспечивает формирование диффузных разрядов при высоких давлениях в отсутствие дополнительного источника для предыонизации промежутка. Установлено, что диффузные разряды формируются за счет широких стримеров при обеих полярностях импульса напряжения.

Сделанный удаленно доклад Г. Гриттани (ELI-Beamlines, Prague, Czech Republic) позволил участникам конференции получить представление о некоторых направлениях исследований, проводимых в новом крупнейшем в Европе центре лазерных исследований ELI-Beamlines в Праге. Европейский проект Extreme Light Infrastructure (ELI) нацелен на исследование взаимодействия коротких лазерных импульсов релятивистской интенсивности с веществом. Г. Гриттани изложил научную программу ELI-ELVA по экспериментальному исследованию различных фундаментальных научных проблем с использованием комбинации лазеров петаваттной и субпетаваттной мощности, которые имеются в распоряжении на исследовательской установке ELI-Beamlines. В основе получения ультра-релятивистских электронных пучков лежит ускорение электронов в плазме при генерации лазерной кильватерной волны, что позволяет достичь ультра-релятивистских энергий электронов на небольших расстояниях с использованием очень высоких ускоряющих градиентов ( $>100$  МэВ/мм). Эксперименты ELI-ELVA, проводимые с помощью лазерных систем тераваттной мощности, представляют интерес с точки зрения междисциплинарных приложений, например, для визуализации изображений в медицине и радиобиологии в интересах неинвазивного контроля.

С.А. Пикуз (ОИВТ РАН, НИЯУ МИФИ) ознакомил слушателей с вопросами генерации, распространения и применения рентгеновского излучения плазмы твердотельной плотности, создаваемого при ее облучении ультракороткими импульсами лазеров большой интенсивности. В экспериментах по взаимодействию пико- и фемтосекундных лазерных импульсов релятивистской интенсивности, превышающей  $10^{21}$  Вт/см<sup>2</sup>,

лазерная энергия эффективно конвертируется в рентгеновское излучение, возникающее при рассеянии горячих электронов в созданной плазме. В свою очередь, интенсивное рентгеновское излучение воздействует на окружающее вещество, приводя к ионизации внутренних оболочек атомов и обеспечивая высокую концентрацию экзотических зарядовых состояний, т.н. состояний “полых ионов”. Сделан обзор недавних экспериментальных работ и результатов по генерации интенсивного рентгеновского излучения и изучению порождаемых им явлений в лазерной плазме твердотельных мишеней.

О генерации сильных магнитных полей в лазерной плазме шла речь в выступлении Ф.А. Корнеева (НИЯУ МИФИ, Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН). Он подчеркнул, что масштаб величины квазистационарных магнитных полей, доступных в условиях лаборатории при использовании импульсных генераторов тока в неразрушающем режиме, ограничен величиной магнитной индукции в десятки Тл. Использование оптических схем генерации магнитного поля позволяет миниатюризировать активную часть генераторов и работать с ними в режиме однократного применения, соответствующего стандартному режиму работы мощных лазерных установок. При этом большая плотность энергии лазерного излучения позволяет достигать величин индукции магнитного поля в ограниченной пространственной области до тысячи Тл и более. Рассмотрены основные схемы лазерной генерации магнитных полей и соответствующие ключевые физические процессы, в частности, генерация импульса тока в мишенях разрядного типа и орбитальное ускорение электронов лазерным импульсом в разреженной плазме.

### 3. МАГНИТНОЕ УДЕРЖАНИЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЫ

На заседаниях секции “Магнитное удержание высокотемпературной плазмы” (председатель секции — А.И. Мещеряков) было представлено 52 доклада, выполненных сотрудниками 17 российских научных центров.

Обсуждались результаты экспериментальных и теоретических исследований, проводимых на действующих в России установках с магнитным удержанием плазмы, таких как токамаки Глобус-М2, Т-11М, ФТ-2, стелларатор Л-2М, открытые ловушки ГДЛ, ГОЛ-3 и СМОЛА. Фигурировали также доклады, посвященные обработке экспериментальных результатов, полученных ранее на токамаке Т-10, который был демонтирован в 2018 г.

Большой интерес вызвали доклады об исследованиях на крупнейшем в России (по такому параметру, как объем плазмы) сферическом тока-

маке Глобус-М2. Этот токамак вступил в строй в 2019 г. после значительной модернизации магнитной системы установки, в результате которой удалось увеличить удерживающее магнитное поле  $B$  в 1.5 раза, с 0.5 до 0.75 Тл. Тем самым, эксперименты на токамаке Глобус-М2 вышли на уровень магнитных полей, не достигнутых пока на других сферических токамаках, действующих в настоящее время в мире: MAST (Великобритания) и NSTX (США). Наиболее важным направлением данных исследований является удержание накопленной энергии плазмы в сферическом токамаке. Скейлинг для сферических токамаков, то есть зависимость энергетического времени жизни от параметров плазмы в установке, существенно отличается от скейлингов для традиционных токамаков. В скейлингах токамаков энергетическое время жизни плазмы пропорционально  $B^\alpha$ . Для сферических токамаков  $\alpha = 1.1-1.4$ , в то время как для традиционных токамаков  $\alpha = 0.15$ . Кроме того, время жизни запасенной в плазме энергии пропорционально электрическому плазменному току, который линейно зависит от величины магнитного поля. Таким образом, в сферическом токамаке увеличение магнитного поля приведет к значительно большему увеличению энергетического времени жизни плазмы, чем аналогичное увеличение магнитного поля в обычном токамаке. Результаты демонстрируют значительный прогресс в экспериментальных работах на сферическом токамаке Глобус-М2.

Продолжается обработка и осмысление экспериментальных данных, ранее полученных на токамаке T-10. Так, в докладе Ю.Н. Днестровского дан сравнительный анализ экспериментов по ЭЦР нагреву СВЧ-излучением с использованием обыкновенной моды на первой гармонике и необыкновенной моды на второй гармонике электронной циклотронной частоты. В экспериментах на T-10 обнаружено, что эффективность нагрева на второй гармонике существенно ниже, чем на первой. Анализ показал, что при средних электронных плотностях  $\bar{n} < 3 \times 10^{19} \text{ м}^{-3}$  СВЧ-нагрев на первой гармонике радикально отличается от нагрева на второй гармонике. При этом в последнем случае оказалось, что не вся вложенная СВЧ-мощность поглощается в плазме.

В ИЯФ СО РАН ведутся исследования на открытых ловушках. Наиболее интересными из них представляются изучение винтового удержания плазмы в открытой ловушке и теоретическое исследование режима динамического удержания в линейной осесимметричной ловушке. Теоретически предсказана экспоненциальная зависимость эффективности подавления потерь от длины участка с винтовым полем, приводящая к существенному повышению эффективного пробочного отношения в открытой ловушке.

Проверка данной концепции проводится на установке СМОЛА в ИЯФ СО РАН. Ранее была показана принципиальная возможность подавления потока плазмы вдоль оси ловушки с помощью винтовой магнитной пробки. Анализ последних экспериментальных результатов, полученных на установке СМОЛА, показал, что эффективность удержания плазмы растет при независимом повышении среднего пробочного отношения, увеличении скорости вращения и росте ведущего магнитного поля.

Одно из основных направлений исследований на стеллараторе Л-2М – удержание накопленной в плазме энергии в условиях рекордно высоких (до 4 МВт/м<sup>3</sup>) для тороидальных ловушек удельных мощностей электронного циклотронного резонансного (ЭЦР) нагрева плазмы (мощность ЭЦР-нагрева до 1000 кВт). Показано, что в плазме стелларатора Л-2М при мощностях нагрева больше 700 кВт происходит постепенное ухудшение удержания энергии плазмы по сравнению с ранее установленным скейлингом стелларатора Л-2М. Анализ экспериментальных зависимостей времени удержания энергии плазмы от мощности нагрева и плотности плазмы показывает, что ухудшение удержания плазмы при больших мощностях ЭЦР-нагрева связано с возрастанием мощности радиационных потерь плазмы, вызванных накоплением примесей в результате образования транспортного барьера при транспортных переходах. Также сообщалось, что в экспериментах наблюдаются плоские в центральной части плазменного шнура профили электронной температуры, что противоречит очень узким расчетным профилям плотности мощности при поглощении вводимого в плазму СВЧ-излучения. Это может быть связано с тем, что в условиях существования “провального” профиля плотности плазмы (в центре плазменного шнура плотность ниже плотности на периферии), возможны распадные процессы, в результате которых необыкновенная волна превращается в электронную бернштейновскую, которая оказывается локализованной в области обратного градиента плотности плазмы и, по-видимому, здесь же поглощается.

По результатам секции можно сделать вывод, что уровень экспериментальных работ, выполняемых на российских термоядерных установках, отстает от уровня работ, выполняемых в США, Японии, Южной Корее, Китае и странах Евросоюза. Это связано с устаревшей технической базой: прежде всего отсутствием новых экспериментальных установок, и низким текущим финансированием работ, связанных с термоядерными исследованиями. В настоящее время ведутся работы по созданию нового токамака T-15 МД, который должен вступить в строй в НИЦ “Курчатовский институт” в 2020 г.

#### 4. ИНЕРЦИАЛЬНЫЙ ТЕРМОЯДЕРНЫЙ СИНТЕЗ

На секции “Инерциальный термоядерный синтез” (председатель Г.А. Вергунова) было представлено 30 докладов. Тематика докладов секции связана с исследованиями в области взаимодействия мощного лазерного излучения с веществом, лазерного термоядерного синтеза, явлений в электровзрывных импульсных системах, физики высоких плотностей энергии, а также с развитием диагностик и численного моделирования процессов в лазерной и электровзрывной плазме.

Для экспериментов в области лазерного термоядерного синтеза в России строится мегаджоульная лазерная установка, которая будет работать на второй гармонике излучения YAG-лазера, в отличие от действующей установки NIF (Ливерморская национальная лаборатория, США), работающей на третьей гармонике. При увеличении длины волны лазера усиливается роль нелинейных процессов, приводящих к рассеянию лазерного излучения и генерации быстрых электронов, которые, проникая во внутренние слои лазерной мишени, препятствуют достижению условий зажигания термоядерной реакции в дейтерий-тритиевой газовой смеси внутри мишени. В докладе коллектива из РФЯЦ-ВНИИТФ сделан обзор расчетных и теоретических работ по моделированию сжатия мишеней прямого облучения с учетом таких нелинейных процессов, как нелокальный теплоперенос, генерация быстрых электронов, вынужденное рассеяние Мандельштама–Бриллюэна, передача энергии в пересекающихся лазерных пучках. Показано, что нелинейные процессы снижают запасы энергии в плазме, которая может расходоваться на зажигание мишеней прямого облучения для мегаджоульных установок с длиной волны излучения  $\lambda = 0.53$  мкм. Переход на третью гармонику увеличивает запас по зажиганию в 3 раза.

В ряде докладов были рассмотрены различные схемы зажигания термоядерного горючего в мишенях. Так, на основании цикла одномерных и двумерных численных расчетов был проделан сравнительный анализ сжатия и горения лазерных термоядерных мишеней при их зажигании сфокусированной ударной волной (“shock ignition”), образующейся при воздействии профилированного по времени лазерного импульса на 2-й и 3-й гармониках излучения Nd лазера. В результате определены параметры мишеней и лазерных импульсов на 2-й и 3-й гармониках Nd лазера, при которых в схеме зажигания мишени ударной волной могут быть достигнуты коэффициенты усиления около 100, что в несколько раз больше, чем при традиционном искровом зажигании. Продолжаются работы по компьютерному моде-

лированию сжатия мишеней непрямого облучения.

Одним из важных направлений исследований является физика и технология изготовления и транспортировки мишеней для лазерного термоядерного синтеза. Получены новые типы мало-плотных сред для лазерных мишеней на основе синтезированных сверхсшитых органосилоксановых и винилареновых полимеров. Улучшается технология создания мишеней, содержащих слои из наночастиц металла и малоплотного пластика.

На установке Ангара-5-1 продолжается изучение сжатия дейтерированной мишени, помещенной внутри волоконного лайнера. Проводятся работы, направленные на увеличение потока мощности на мишень от Z-пинчевого разряда. С этой целью проведены эксперименты с квазисферическими проволочными сборками малого диаметра (до 13 мм) и вложенными квазисферическими сборками, где внешняя сборка была квазисферической, а внутренняя – цилиндрической. Такая конструкция сборки позволяет перейти от цилиндрической геометрии сжатия к сферической. В результате плотность энергии в пинче выросла в 4 раза.

Продолжаются работы по генерации и исследованию терагерцового излучения из лазерной плазмы, создаваемой при воздействии фемтосекундного лазерного излучения на газовые среды. Эти работы важны с точки зрения возможности получения ультраширокого спектра излучения в диапазоне от 0.1 до 200 ТГц. Методом просвечивающей интерферометрии экспериментально изучен процесс формирования плазменного канала (филамента) в воздухе, азоте и аргоне в течение первых сотен пикосекунд разряда для различной длительности мощного фемтосекундного лазерного импульса. Предложена эффективная схема генерации терагерцовых волн, когда два лазерных импульса, распространяющихся навстречу друг другу, взаимодействуют в разреженной плазме с достаточно высоким коэффициентом преобразования в терагерцовое излучение.

Практически все доклады на секции относились к поисковым направлениям, нацеленным на решение актуальных проблем физики лазерно-плазменного взаимодействия, лазерной и электроразрядной плазмы. Налаженная кооперация и широкая экспериментально-диагностическая база способствуют стабильному развитию исследований, проводимых на электроразрядных установках в различном диапазоне мощности. Предложенные российскими учеными перспективные методы быстрого зажигания и зажигания лазерных термоядерных мишеней сфокусированной ударной волной исследуются в США, Японии, странах Евросоюза.

## 5. ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЕ

В рамках работы секции “Физические процессы в низкотемпературной плазме” (председатель В.С. Воробьев) обсуждались 50 докладов. Традиционная тематика включает в себя следующие основные направления: элементарные процессы и кинетические свойства газоразрядной низкотемпературной плазмы, термодинамические и транспортные свойства так называемой теплой плотной материи (*warm dense matter*), различные применения низкотемпературной плазмы, явления в плазме, возникающие в импульсных процессах.

В ряде устных докладов рассматривались вопросы физики низкотемпературной плазмы, связанные с проявлением в том или ином виде эффектов неидеальности. При сжатии плазмы паров металлов при температурах выше критических плазма приобретает ряд свойств, присущих металлам. В первую очередь, речь идет о появлении электронного желе — зачатка зоны проводимости, а также о возникновении квантовой коллективной энергии связи атомов — когезии. Электронное желе возникает из-за перекрытия хвостов распределений электронной плотности связанных электронов, лежащих вне ячейки Вигнера—Зейтца. В настоящее время разработана модель газообразного металла, которая описывает эти “металлические” свойства плазмы, состоящей из ионов металлов. Модель позволяет рассчитать и указать на фазовой диаграмме “температура—плотность” область существования “газометаллической” плазмы, т.е. ту область, где электроны желе доминируют над электронами, возникающими при термической ионизации.

На заседаниях секции также рассматривались фундаментальные и прикладные задачи, связанные с исследованием различных теплофизических свойств плазмы: уравнений состояния и электронных коэффициентов переноса. Для низкотемпературной плазмы металлов или полупроводников изучение этих свойств представляет собой особую сложность, так как, в отличие от газов, эта плазма находится при сравнительно высоких температурах (выше 5 кК), где сложно провести эксперимент. При теоретическом исследовании такой плазмы также возникает ряд проблем, особенно при повышении плотности хотя бы до 0.1 от значения плотности при нормальных условиях, когда существенным становится взаимодействие между частицами. В последние годы для ряда металлов и полупроводников появились новые данные как экспериментальных измерений, так и расчетов.

Продолжаются исследования микроволновых разрядов в жидких углеводородах. Докладывались результаты изучения эмиссионных спектров и газофазных продуктов разряда в широком клас-

се углеводородов: гексан, *n*-гептан, декан, пентадекан, циклогексан, толуол, орто-ксилол, нефтяной растворитель Nefras S2 80/120. Они показали, что с увеличением молекулярной массы алкана происходит увеличение выхода ацетилена и уменьшение выхода водорода; в разрядах в ароматических соединениях (толуол и орто-ксилол) преимущественно образуется водород и ацетилен, а в продуктах микроволнового разряда в циклоалканах и ароматических соединениях без радикальных групп практически не содержатся метан или этилен.

Традиционно, на секции были представлены работы по диагностике низкотемпературной плазмы, в частности, спектральные измерения температуры электронов и ионов в криптоновой плазме токовых слоев. Интерес к тепловым процессам в токовых слоях связан с тем, что в некоторых режимах сильный импульсный нагрев приводит к быстрому разрушению токового слоя, инициируя начало пересоединения магнитных силовых линий. Аналогичные явления могут происходить и на Солнце непосредственно перед началом вспышки. Лабораторные исследования токовых слоев позволяют проверить гипотезу о “тепловом триггере”, запускающем такого рода процессы, приводящие к вспышкам на Солнце.

Интерес вызвала работа, посвященная биомедицинским приложениям: рассматривалось действие высокодисперсного аэрозоля на здоровье операторов при применении низкотемпературной плазмы. Плазменные технологии повсеместно используются при термической резке и обработке деталей в металлургической промышленности. При этом металлы испаряются и образуют мелкие аэрозоли, которые могут иметь неблагоприятные последствия для здоровья работников. Установлено, что у операторов плазматронов и плазменных установок различного назначения уже при стаже до 5 лет диагностируются хронические воспалительно-дегенеративные заболевания верхних дыхательных путей, частота которых увеличивается со стажем работы.

Работа секции показала, что ряд новых направлений, такие как свойства ультрахолодной плазмы, состояния вещества типа “warm dense matter”, свойства низкотемпературной плазмы при пробое газов и конденсированных сред, успешно развиваются в России и не уступают мировому уровню.

## 6. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПЛАЗМЕННЫХ И ЛУЧЕВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

На заседаниях этой секции (руководители С.А. Двинин и А.Ф. Александров) заслушано 30 докладов; были представлены стендовые доклады в соавторстве с иностранными участниками

ми из Штутгартского университета (Германия), Эдинбургского университета (Великобритания) и Таджикского национального университета.

Охвачены основные направления плазменных и лучевых технологий: генерация терагерцового и СВЧ-излучения, воздействие плазмы на твердые тела (диэлектрики, металлы и композиты со сложной структурой), воздействие мощных электронных пучков, методы создания ионных и электронных пучков и их диагностика. Также были доклады, посвященные плазменным методам нанесения покрытий и свойствам полученных пленок, вопросам распространения разряда в постоянном поле и в микроволновом пучке, а также созданию сильноточного разряда в атмосфере и исследованию разрядов в газовых смесях сложного химического состава (плазмохимия). В ряде работ рассматривалось влияние быстрого нагрева газа наносекундным разрядом на воспламенение горючих смесей, изучалось воздействие наносекундного импульсного разряда на гидродинамические течения и исследовалось распространение ударных волн в твердом теле под воздействием электронного пучка.

Традиционно были представлены работы, в которых изучались структура микроплазменного разряда на поверхности металлов и динамика разряда в порошке из смеси диэлектриков, инициируемого разрядом в азоте.

В большинстве сообщений описывались эксперименты, однако присутствовали и теоретические работы, а также доклады, объединившие экспериментальные и теоретические результаты.

Остановимся подробнее на тех направлениях, по которым было представлено наибольшее количество работ. Большой интерес вызвали доклады из Новосибирска (ИЯФ СО РАН, Новосибирский государственный университет) о способах создания плазменного столба с различными градиентами плотности электронов для эффективной трансформации энергии верхне-гибридных волн, возбуждаемых электронным пучком, в электромагнитную волну. Также была экспериментально исследована генерация субмиллиметровых волн (0.1–0.8 ТГц) за счет коллективной релаксации пучка релятивистских электронов в замагниченной плазме: энергия электронов 0.8 МэВ, ток электронного пучка 20 кА, длительность импульса пучка 6 нс. Эти эксперименты проводились на установках ГОЛ-3 и ГОЛ-3Т и на специализированной установке GOL-PET. Эксперименты показали, что в случае сильного радиального градиента плотности плазмы основная доля мощности потока субмиллиметрового излучения, выходящего вдоль оси плазменного столба, сосредоточена в частотном интервале 0.15–0.3 ТГц.

Коллективом авторов из ИОФ РАН экспериментально изучен эффект подавления шумов в плазменном СВЧ-усилителе на основе релятивистского электронного пучка (РЭП) и обнаружены режимы излучателя на основе РЭП, в которых в процессе импульса излучения происходит быстрое изменение частоты излучаемой электромагнитной волны.

В работах по изучению взаимодействия плазмы с поверхностью (НИЦ “Курчатовский институт”) исследовано проникновение изотопов водорода через перспективные материалы ядерной энергетики. Был также представлен проект использования геликонного разряда для воздействия на материалы термоядерных реакторов. Доклад научного коллектива из ФИАН и Института металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН был посвящен воздействию плазмы “плазменного фокуса” на металлические фольги, а в работе авторов из НИЦ “Курчатовский институт” и Штутгартского университета исследовано воздействие струи плазменного двигателя на мишень из вольфрама.

Растет число работ, имеющих явную технологическую направленность. Можно отметить тенденцию к модернизации больших экспериментальных установок и созданию новых диагностик, но это сдерживается ухудшением государственного финансирования.

## 7. ПРОЕКТ ИТЭР. ШАГ В ЭНЕРГЕТИКУ БУДУЩЕГО

В этом году на секцию (председатель А.В. Крайнихников) было представлено 38 докладов.

На строительной площадке международного проекта ИТЭР (Кадараш, Франция) полным ходом идут строительные работы. Из 100 ключевых этапов работ, т.н. “IC milestones”, к концу 2019 г. выполнено 42. Возведено перекрытие над шахтой сборки установки токамака. Это событие является знаковым – начато сооружение помещений, где будет собираться сам токамак-реактор.

Доклады устного заседания были посвящены состоянию работ по созданию всех систем проекта ИТЭР. Было отмечено, что в 2019 г. Россия полностью выполнила свои международные обязательства по проекту ИТЭР.

В настоящий момент в рамках обязательств перед международной организацией ИТЭР в российском агентстве “Проектный центр ИТЭР” продолжается разработка диагностической системы Вертикальная нейтронная камера. Данная система построена на основе многоканальных нейтронных коллиматоров и предназначена для измерения профиля нейтронного источника и профиля термоядерной мощности в реальном времени. В ходе разработки диагностики прихо-



дилось решать проблему значительного фона рассеянных нейтронов в каналах коллиматоров и как следствие низкого отношения сигнал – фон. Для этого была переработана конструкция блока быстрых нейтронов и оптимизирована форма каналов коллиматоров.

В рамках российского вклада в проект ИТЭР Частное учреждение “Проектный центр ИТЭР” разрабатывает диагностическую систему Диверторный монитор нейтронного потока (ДМНП). Данная система предназначена для измерения динамики полного нейтронного выхода и термоядерной мощности. Диагностика состоит из трех идентичных модулей, в которых размещены ионизационные камеры деления с различным изотопным составом делящегося вещества ( $^{235}\text{U}$  и  $^{238}\text{U}$ ). Диапазон измерения полного нейтронного выхода диагностикой ДМНП составляет от  $10^{14}$  до  $10^{20}$  н/с.

Управление работой реактора ИТЭР требует разработки и создания необходимых средств диагностики термоядерной плазмы. Одним из них является так называемый метод активной спектроскопии (английская аббревиатура CXRS – Charge Exchange Recombination Spectroscopy) с использованием диагностического или нагревного пучка атомов. Эта диагностическая система для ИТЭР также разрабатывается в России. Активная спектроскопия позволяет измерять такие параметры, как ионная температура, скорость тороидального и полоидального вращения плазмы, концентрация легких примесей (в том числе гелиевой золы) по всему сечению плазменного шнура с высоким пространственным разрешением.

Важной частью экспериментальной программы ИТЭР станет мониторинг электронных параметров в диверторе. Знание электронной температуры и плотности необходимо как для изучения плазмы в диверторном объеме, так и для контроля нагрузки на диверторные пластины и контроля положения выхода магнитной сепаратриссы на диверторные пластины. Разработка диагностического комплекса томсоновского рассеяния дивертора токамака ИТЭР также находится в рамках ответственности России.

Одной из нерешенных задач проекта ИТЭР является проблема эрозии первой стенки и дивертора при взаимодействии с горячей плазмой. По сравнению с существующими установками для магнитного удержания плазмы, токамак ИТЭР будет иметь большую длительность разряда и большой поток тепла на компоненты вакуумной камеры, обращенные к плазме. Более того, во время экспериментальной кампании ИТЭР не могут быть исключены мощные импульсные воздействия на поверхность дивертора. В этих случаях эрозия материала значительно увеличится, на поверхности будет появляться расплавленный

слой, из которого возможен выброс микрочастиц. Микрочастицы могут проникнуть в центр плазмы и вызвать значительный рост радиационных потерь, что, в свою очередь, может привести к проблемам с удержанием высокотемпературной плазмы. Кроме этого, накопление большого количества микрочастиц в вакуумной камере приведет к накоплению радиоактивного трития, количество которого ограничено требованиями радиационной безопасности.

Работа секции показала существенный прогресс в научно-исследовательских и конструкторских работах в поддержку проекта ИТЭР в рамках ответственности по поставкам Российской Федерации.

## 8. КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЛАЗМОФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

На конференции секция под таким названием была организована впервые. Председательствовал В.А. Скворцов, заслушано 8 докладов.

Несмотря на то, что секция имела характер “математический”, в докладах обсуждалась также и физика рассматриваемых плазменных процессов, необходимость учета или пренебрежения некоторыми физическими эффектами при компьютерном моделировании. Также проводились сравнения результатов моделирования с имеющимися экспериментальными результатами, рассматривались явления и прогнозировались новые будущие экспериментальные результаты.

Обсуждался проект высокотемпературного тороидального реактора с газовым охлаждением, разрабатываемый на протяжении последних нескольких лет в Томском политехническом университете. В развитие этого проекта предложен гибридный реактор с подкритической топливной сборкой и аксиально-симметричной ловушкой в качестве источника нейтронов (ИН). Были представлены результаты по исследованию трехмерных полей нейтронного поля и тепловыделения в реакторной системе, работающей в подкритическом режиме с источником DD- и DT-нейтронов. К сожалению, к.п.д. систем, использующих только дейтерий, невысок по сравнению с системами, использующими дейтерий и тритий.

В ИЯФ СО РАН многие годы проводятся исследования по удержанию горячей плазмы в линейных газодинамических ловушках. На секции фигурировал доклад о влиянии нейтрального газа, образующегося в расширителе ловушки, на удержание плазмы. Нейтральный газ перераспределяется по всему объему плазменного столба, приводя к снижению эффективности работы расширителя. Влияние концентрации нейтрального газа изучалось в вычислительном эксперименте в рамках упрощенной кинетической модели, не

претендующей на высокую точность, но правильно предсказывающей особенности заполнения плазмой вакуумных камер с остаточным газом.

Были представлены результаты математического моделирования сложных взаимосвязанных радиационно-магнитогидродинамических процессов взаимодействия интенсивного пикосекундного лазерного излучения с металлическими мишенями в атмосфере различных газов применительно к конкретной экспериментальной лазерной установке: неодимовый лазер на стекле Nd YAG, длина волны 1.06 мкм, максимальная интенсивность в области фокусировки  $I_0 = 7.2 \times 10^{13}$  Вт/см<sup>2</sup> для главного лазерного импульса длительностью 100 пс по полувысоте. Показано, что даже при рассматриваемых сравнительно умеренных интенсивностях пикосекундных лазерных импульсов в плазме возможна генерация рекордно высоких по величине магнитных полей (с индукцией не только в сотни МГс, но вплоть до 1–2 ГГс). Однако генерацию таких полей трудно диагностировать, т.к. она происходит в сравнительно малых объемах в течение сравнительно коротких интервалов времени (менее 10 пс).

Все доклады были посвящены актуальным вопросам современной плазменной энергетики и физики. Они содержали новые результаты, вызвавшие большой интерес и отклики участников. Первая попытка проведения данной секции показала и одно неоспоримое преимущество вычислительных экспериментов (по сравнению с натурными) – это возможность “включать” и “выключать” в ходе экспериментов те или иные физические эффекты, выявляя их роль и значимость в работе моделируемых реальных физических систем и процессов.

## 9. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Очередная Звенигородская конференция по физике плазмы и УТС способствовала решению научных проблем в важных направлениях исследований. Ежегодно происходящий обмен информацией и опытом между учеными России, стран дальнего и ближнего зарубежья способствует установлению и поддержанию научных контактов между научными центрами, занимающимися близкими проблемами. Это подтверждается работами, совместно выполненными сотрудниками российских и зарубежных научных центров.

Общее число представленных докладов уменьшилось в связи с отсутствием финансирования конференции со стороны РФФИ: правила предоставления гранта РФФИ на организацию конференции изменились таким образом, что для такого масштабного научного мероприятия, как

Международная Звенигородская конференция, имеющего почти полувековую историю, оказалось невозможным претендовать на получение поддержки РФФИ. Оргкомитету конференции пришлось пойти на увеличение стоимости участия в конференции. В результате заметно уменьшилось число докладов, представленных небольшими коллективами авторов.

Руководством РФ принята программа “Развития техники, технологий и научных исследований в области использования атомной энергии на период до 2024 года”, реализацию которой контролирует государственная корпорация “Росатом”. Программа, прежде всего, нацелена на освоение перспективных плазменных и термоядерных технологий. Эта программа в случае ее реализации может создать мощный импульс для интенсивного развития плазменных технологий и промышленных установок в России, таких как новые термоядерные источники нейтронов, перспективные плазменные технологии обработки материалов и установки по производству новых веществ для применения в различных отраслях промышленности, медицине и сельском хозяйстве. Однако эта программа чисто технологическая, она не может заменить программу фундаментальных исследований, которые создают новые знания в области физики. Поэтому программа фундаментальных исследований по физике плазмы крайне необходима для развития этого огромного направления, и ее подготовка и принятие должны быть реализованы в самое ближайшее время.

Оргкомитетом конференции издан Сборник тезисов докладов [1], при этом статьям присвоен соответствующий код DOI. Материалы конференции также размещены на сайте конференции [2].

Работа выполнена в соответствии с государственными заданиями №№ АААА-А18-118122500105-4 (Физика высокотемпературной плазмы. Фундаментальные проблемы динамики, удержания и нагрева плазмы в трехмерных магнитных конфигурациях), А18-118013000293-4 (Фундаментальные основы плазменных и микроволновых технологий) и Программой РАН № 6 “Новые подходы к созданию и изучению экстремальных состояний вещества”.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. XLVII Международная Звенигородская конференция по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу” 16–20 марта 2020 г., г. Звенигород. Сб. тез. докл. М.: ЗАО НТЦ ПЛАЗМАИОФАН, 2020. ISBN 978-5-6042115-2-6.
2. [http://www.fpl.gpi.ru/Zvenigorod/XLVII/Zven\\_XLVII.html](http://www.fpl.gpi.ru/Zvenigorod/XLVII/Zven_XLVII.html)